MEDIÇÃO DE RESPOSTA EM FREQÜÊNCIA E IMPEDÂNCIA TERMINAL COMO TÉCNICA DE DIAGNÓSTICO APLICADA A TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Walter R. Cerqueira Filho, Alexandre Neves, Helvio J. A. Martins, José A. Duque, Roberto Campos, Carlos Moya, Bianca Leyen, Ricardo Cerbino
CEPEL- Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ALAB/LABDIG - Laboratório de Diagnóstico Em Equipamentos Elétricos
Rio de Janeiro - RJ
walter@cepel.br

***Resumo* – Este trabalho apresenta as metodologias utilizadas para o desenvolvimento e aplicação das técnicas de medição de Resposta em Freqüência e Impedância Terminal e alguns resultados de suas aplicações a transformadores de potência, enfatizando as potencialidades das técnicas como ferramentas de diagnóstico para tais equipamentos.**

Palavras Chave: Transformadores, Resposta em Freqüência, Impedância Terminal

I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de técnicas de diagnóstico e monitoração que possam avaliar a integridade dos transformadores de potência ao longo de sua vida útil torna-se de grande utilidade devido a importância de tais equipamentos no sistema.

Dentre as várias técnicas disponíveis, a medição da resposta em freqüência do equipamento tem sido utilizada, a princípio, no auxílio à modelagem do equipamento para estudos de transitório, identificação de ressonâncias internas e mais recentemente como caracterização do equipamento numa ampla faixa de freqüências a ser utilizada / confrontada ao longo de sua vida útil.

Embora a aplicação da técnica seja mais apropriada a equipamentos novos ou reformados que estejam entrando em serviço, ela pode e deve ser aplicada em equipamentos de posição estratégica em operação no sistema, visto que é possível identificar que tipo de interação pode existir entre o transformador e as manobras de equipamentos na subestação (capacitores, reatores, alimentadores, etc.,).

A aplicação da técnica em fases distintas, ao longo da vida do transformador é também capaz de identificar possíveis alterações geométricas das bobinas causadas por esforços eletromecânicos devido, principalmente, aos curtos-circuitos que ocorrem nas vizinhanças do equipamento.

O CEPEL vem trabalhando na área de diagnóstico em equipamentos elétricos há algum tempo utilizando estas técnicas em transformadores e autotransformadores de potência, novos e em operação, de várias concessionárias do setor elétrico brasileiro.

Neste trabalho serão apresentados vários exemplos de medições realizadas no campo e no laboratório, não tendo a preocupação com o diagnóstico do equipamento, mas sim enfocando as principais características e potencialidades das técnicas de medição como ferramenta de diagnóstico.

II. METODOLOGIAS

Para subsidiar diagnóstico e modelagem em transformadores de potência, pode-se utilizar as técnicas de medição de impedância terminal com a freqüência e a medição de resposta em freqüência dos enrolamentos de alta e baixa tensão. As técnicas são de certa forma bastante simples, utilizando-se sinais de baixa tensão e freqüência variável na faixa compreendida entre 10Hz e 1MHz. Entretanto, as configurações dos enrolamentos assim como o tipo de transformador irão determinar alguns parâmetros tais como os tipos de ligações e amplitude dos sinais a serem aplicados.

Por se tratarem de técnicas "off-line", a medição de impedância terminal assim como da resposta em freqüência, devem ser realizadas com o transformador totalmente desconectado do sistema.

A seguir serão descritas cada uma das técnicas mostrando suas principais características.

III. MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA TERMINAL

Esta técnica baseia-se na medição da impedância terminal do transformador de potência em diversas freqüências, através da utilização de uma ponte de medição de impedâncias com freqüência variável. Normalmente a faixa de freqüência está compreendida entre 10Hz e 1MHz com um total de 200 pontos de medição. Os "steps" de freqüência podem ser escolhidos manualmente ou automaticamente, o que dependerá da ponte de medição a ser utilizada. No mercado existem vários

tipos de pontes de medição de impedância de diversos fabricantes.

Para o desenvolvimento deste trabalho utilizou-se uma ponte de medição automática com freqüência na faixa de 10Hz a 1MHz com precisão básica de medição em torno de 1%. Possui unidade de disco 3 ½” para armazenamento dos dados e interfaces GPIB e RS-232 para operação remota e comunicação com outros instrumentos.

Circuitos típicos de medição

O número de medições a ser realizado será função do número de enrolamentos do transformador. No caso de um transformador trifásico com ligações delta e estrela deve-se realizar um total de seis medições de impedância terminal. As figuras III.1 e III.2 mostram um exemplo típico deste transformador.

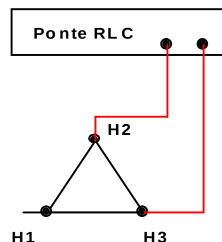


Figura III.1: Transformador trifásico medição terminais H.

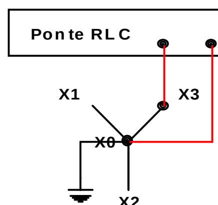


Figura III.2: Transformador trifásico medição terminais X.

Conecta-se a ponte de impedância aos terminais externos do transformador referente ao enrolamento sob análise e mede-se a impedância, variando-se a freqüência no intervalo de interesse, por exemplo, de 10Hz à 1MHz. Obtêm-se para cada freqüência o valor da impedância em módulo e ângulo. O procedimento é repetido então para cada enrolamento do transformador sendo que os enrolamentos não envolvidos na medição ficam abertos.

A título de exemplo as figuras III.3 e III.4 mostram respostas típicas de impedância e ângulo, respectivamente, para os enrolamentos de um transformador trifásico 138/13.8kV, 60MVA e um transformador monofásico 13,8/500 kV, 63,3 MVA.

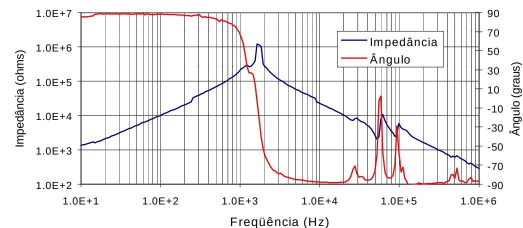


Figura III.3: Medição de Impedância e ângulo em um transformador trifásico. Medição nos terminais H2-H3.

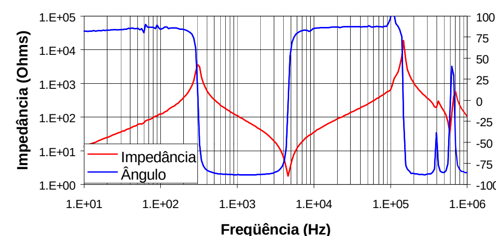


Figura III.4: Medição de Impedância e ângulo em um transformador monofásico. Medição nos terminais X.

IV.MEDIÇÃO DA RESPOSTA EM FREQÜÊNCIA

A medição da resposta em freqüência, ou seja, medição da relação de transformação em freqüências distintas de 60 Hz, é realizada aplicando-se um sinal senoidal (entre 5V $_{ef}$ e 10V$_{ef}$), com freqüência variável na faixa de 20 Hz a 1 MHz, a um dos enrolamentos do transformador de potência, medindo-se a transferência deste sinal para outro enrolamento.

Este tipo de medição permite avaliar as amplificações (ressonâncias) e atenuações (anti-ressonâncias), indicando a freqüência onde ocorrem. Normalmente estes valores são normalizados, tomando-se como base a relação de transformação à freqüência de 60 Hz.

A consistência desta medição está na obtenção da relação nominal dos enrolamentos envolvidos, com a aplicação do sinal em freqüência próxima aquela de trabalho (50 a 100 Hz).

Este tipo de medição é bastante importante no sentido de avaliar possíveis interações entre surtos no sistema e o equipamento, bem como tornar conhecidos os pontos mais sensíveis do transformador.

Circuitos típicos de medição

Assim como na medição de impedância, o número de medições será função do modelo do transformador. Alguns circuitos típicos de medição são mostrados nas figuras IV.1 e IV.2

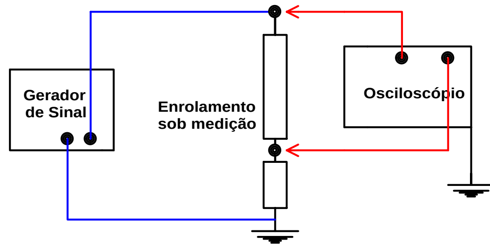


Figura IV.1: Autotransformador

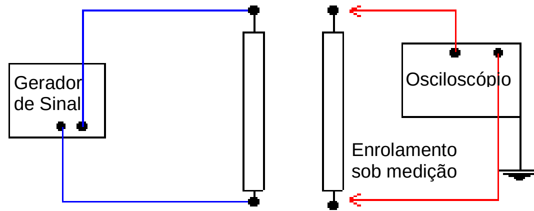


Figura IV.2: Transformador monofásico

Nos gráficos da resposta em freqüência, são apresentadas a relação entre o valor do sinal de tensão de saída e o sinal de tensão de entrada ($V_{saída}/V_{entrada}$, no eixo das ordenadas), em função da freqüência (no eixo das abscissas).

A relação $V_{saída}/V_{entrada}$ é normalizada tendo como base a relação nominal do transformador para a posição considerada da chave comutadora. A forma de tratamento utilizada para os resultados de medição de transferência de tensão com as normalizações correspondentes é apresentada na tabela IV.1.

Tabela IV.1: Relação normalizada para medição da tensão de transferência

Tensão aplicada entre os terminais H:	$\mathbf{V_{H\ aplicada}}$
Tensão medida entre os terminais X:	$\mathbf{V_{X\ medida}}$
Tensão nominal entre os terminais H:	$\mathbf{V_{H\ nominal}}$
Tensão nominal entre os terminais X:	$\mathbf{V_{X\ nominal}}$

As tensões nominais são obtidas diretamente dos dados de placa do transformador e dependem das conexões estabelecidas nas chaves comutadoras associadas ao enrolamento de regulação.

No caso de um transformador trifásico com ligação delta e estrela, as tensões base utilizadas para a normalização são calculadas a partir das tensões em cima de cada enrolamento X (ligação estrela) e H (ligação delta), mostradas na figura IV.3.

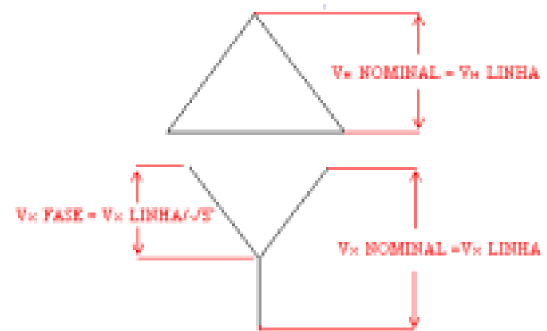


Figura IV.3: Tensões nominais e tensões nos enrolamentos X e H.

Tensões Base:

$$V_{X\ BASE} = \frac{V_{X\ NOMINAL}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{H\ BASE} = V_{H\ NOMINAL}$$

Quando os terminais de aplicação da tensão estão no enrolamento de alta (H), e os terminais onde a resposta de tensão é medida estão no enrolamento de baixa (X), a normalização da tensão transferida entre eles é dada por:

$$V_{X/H\ (p.u.)} = \frac{V_{X\ MEDIDA} / V_{H\ APLICADA}}{V_{X\ BASE} / V_{H\ BASE}}$$

Já quando os terminais de aplicação da tensão estão no enrolamento de baixa (X), ligado em estrela, e os terminais onde a resposta de tensão é medida estão no enrolamento de alta (H), ligado em delta, a normalização da tensão transferida é:

$$V_{H/X\ (p.u.)} = \frac{V_{H\ MEDIDA} / V_{X\ APLICADA}}{V_{H\ BASE} / V_{X\ BASE}}$$

V. APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS

Há algum tempo o laboratório de diagnóstico em equipamentos elétricos (LABDIG) do CEPEL vem desenvolvendo e aplicando estas técnicas a transformadores de potência para diversas concessionárias do setor elétrico e fabricantes de equipamentos elétricos. Os ensaios podem ser realizados no campo, na fábrica ou em laboratório.

Durante extensos trabalhos desenvolvidos pelo LABDIG nos quais foram aplicadas diversas técnicas de diagnóstico em equipamentos elétricos em conjunto, foi possível perceber a importância destas duas técnicas para as conclusões finais a respeito do equipamento sob análise. A seguir, a título de exemplo, serão apresentados alguns casos mostrando resultados obtidos em transformadores de potência.

1. Primeiro caso:

A partir da aplicação das técnicas de medição de Impedância Terminal e de Resposta em Freqüência durante trabalho desenvolvido pelo CEPEL foi possível avaliar de que forma o projeto de um equipamento influi nos dados obtidos por estas duas técnicas, e identificar que tipo de interação pode existir entre o transformador e as manobras de equipamentos na subestação.

As medições foram feitas em seis transformadores de três fabricantes diferentes: Um transformador do fabricante A, três transformadores do fabricante B, um dos quais sinistrado, e dois transformadores do fabricante C, um deles inteiramente reformado.

A figura V.1 mostra o espectro de freqüência obtido para dois transformadores com o mesmo projeto.

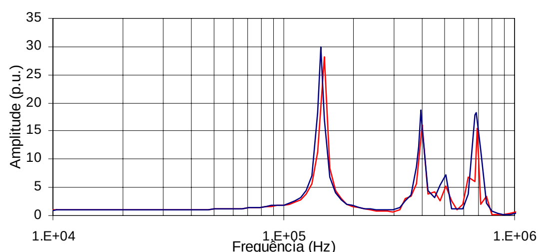


Figura V.1: Comparação da resposta em freqüência de transformadores de mesmo fabricante. Aplicação da tensão em H (delta) e medição em X (estrela).

Podemos notar claramente a semelhança entre a resposta em freqüência obtida para transformadores de mesmo projeto, como no caso acima. Isto caracteriza equipamentos pertencentes à mesma família.

A figura V.2 mostra a comparação da resposta em freqüência medida em transformadores de 4 diferentes fabricantes.

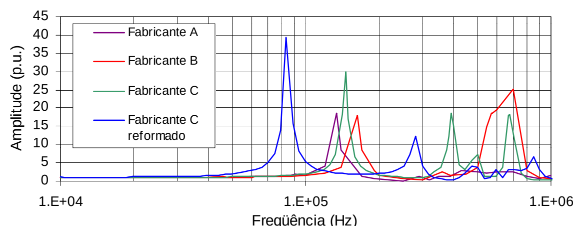


Figura V.2: Comparação da resposta em freqüência de transformadores de fabricantes diversos. Aplicação da tensão em H (delta) e medição em X (estrela).

Analisando a figura acima, podemos perceber a diferença entre os espectros obtidos para os quatro equipamentos analisados, devido aos seus projetos distintos. É interessante destacar a influência da reforma feita em um transformador do fabricante C. Nota-se que houve uma reformulação de projeto durante a reforma, devido à diferença entre o espectro deste transformador (representado em azul na figura V.2), e o espectro de um de seus "irmãos" (representado em verde).

Ainda a partir da figura V.2, podemos identificar uma larga faixa de ressonância entre as freqüências de 500 a 800 kHz nos equipamentos do fabricante B, que não está presente nas respostas dos demais fabricantes. Foram feitas as medições das formas de onda decorrentes das manobras de disjuntores próximos aos transformadores analisados. Através da transformada de Fourier destas formas de onda, foi possível perceber que as componentes com freqüências mais críticas, com amplitude significativa, se encontravam exatamente na faixa de ressonância dos equipamentos do fabricante B. Isto torna a condição de funcionamento do equipamento bastante crítica. Há algum tempo foram registradas falhas em algumas unidades do fabricante B. De acordo com as medições, supõe-se que as causas das falhas podem estar associadas aos transitórios de chaveamento dos disjuntores da subestação onde eles se encontravam.

2. Segundo caso:

Durante um segundo trabalho desenvolvido pelo CEPEL, foi possível apontar o caso de um transformador com deslocamento de bobinas de baixa tensão a partir dos gráficos obtidos na medição de Resposta em Freqüência. O deslocamento foi confirmado posteriormente com a abertura do equipamento. As figuras V.3 e V.4 se referem a transformadores de mesmo fabricante, sendo que em um deles foi detectado o deslocamento das bobinas de baixa tensão.

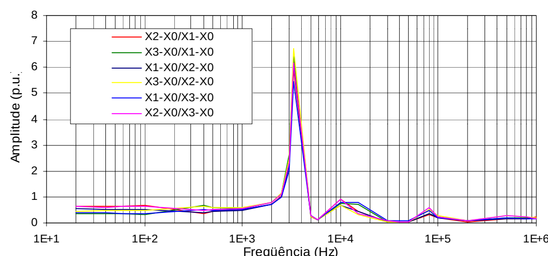


Figura V.3: Aplicação da tensão em X (estrela), medição das tensões induzidas nos demais enrolamentos de baixa tensão. Equipamento são.

Para a aplicação de tensão em cada um dos três enrolamentos de baixa tensão a figura V.3 mostra o espectro de freqüência das tensões induzidas nos outros dois enrolamentos de baixa tensão do transformador. Analisando cuidadosamente estas respostas, podemos notar que há correspondência entre os 3 pares de curvas existentes, como relacionado na tabela V.1.

Tabela V.1: Correspondência entre os espectros de freqüência das tensões induzidas nos enrolamentos de baixa tensão.

Correspondência	Cor	Medição/Aplicação
Direta entre X1 e X3	azul verde	X1-X0/X3-X0 X3-X0/X1-X0
Medição em X2	magenta vermelho	X2-X0/X3-X0 X2-X0/X1-X0
Aplicação em X2	azul escuro amarelo	X1-X0/X2-X0 X3-X0/X2-X0

Já a figura V.4 não apresenta uma correspondência tão nítida. Podemos distingüir duas faixas de freqüência nas quais os gráficos de medições correspondentes como descrito acima diferem significativamente.

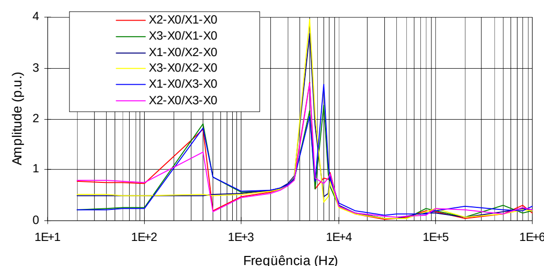


Figura V.4: Aplicação da tensão em X (estrela), medição das tensões induzidas nos demais enrolamentos de baixa tensão. Equipamento com deslocamento de bobinas.

Uma diferença entre os espectros das curvas correspondentes representa neste caso algum tipo de deformação nos enrolamentos de baixa tensão.

3. Terceiro caso:

Um terceiro trabalho desenvolvido pelo CEPEL proporcionou um exemplo das técnicas de resposta em freqüência e Impedância terminal aplicadas a um caso extremo, no qual parte de um dos enrolamentos de um transformador monofásico 13,8/500 kV, 63,3 MVA encontrava-se em curto-circuito.

As Figuras V.5, V.6 e V.7 mostram, para três transformadores de uma única família (mesmo projeto, idade e localização no sistema elétrico), a resposta em freqüência tanto vista pela alta quanto pela baixa tensão, e o comportamento da impedância terminal para os enrolamentos de baixa tensão.

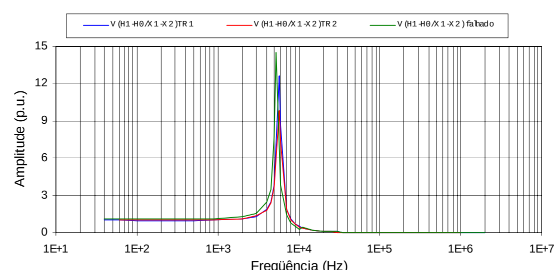


Figura V.5: Resposta em freqüência. Aplicação na baixa (X1-X2)e medição na alta (H1-H0).

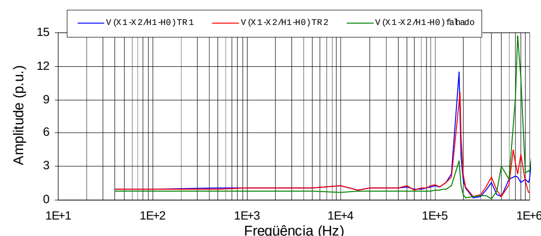


Figura V.6: Resposta em freqüência. Aplicação na alta (H1-H0) e medição na baixa (X1-X2).

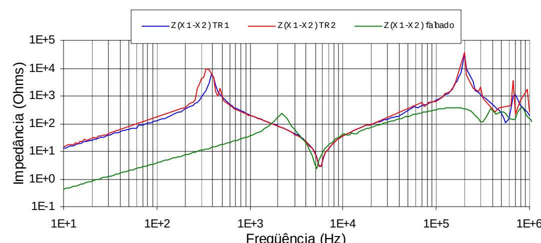


Figura V.7: Impedância terminal dos enrolamentos de baixa tensão.

Analisando as figuras V.5, V.6 e V.7 pode-se perceber que o espectro de freqüência do transformador falhado, quando a aplicação é feita no enrolamento de baixa tensão, não sofreu grandes modificações na sua forma quando comparado ao espectro de outros dois equipamentos de mesma família, houve apenas um aumento da amplificação da tensão transferida na sua faixa de ressonância (figura V.5). Já quando a aplicação é feita no enrolamento de alta tensão, podemos perceber uma atenuação da primeira ressonância, entre 100 e 200KHz e a existência de um pico de ressonância bastante elevado, com uma amplificação da ordem de 15 p.u. na faixa de 600KHz a 1MHz (figura V.6). A curva de impedância terminal de baixa do transformador cujo enrolamento sofreu curto-circuito parcial apresenta uma clara distorção em relação às demais curvas de equipamentos de mesma família(figura V.7).

VI. CONCLUSÃO

Dentre as técnicas de diagnóstico de transformadores de potência existentes, as medições de Impedância Terminal e Resposta em Freqüência têm se mostrado bastante importantes na avaliação do estado geral do equipamento.
Neste trabalho, estas técnicas foram detalhadas e exemplificadas, focalizando-se suas principais características e alguns exemplos de medições realizadas.

Os casos apresentados puderam mostrar a potencialidade das duas técnicas em três casos distintos. De acordo com os resultados observa-se que tais técnicas podem ser muito úteis no projeto do equipamento para estudo de transitórios. Verificou-se que conhecendo-se o espectro da resposta em freqüência do equipamento pode-se tomar medidas operacionais para que manobras do sistema não contenham componentes de freqüência dentro da faixa de ressonância do transformador.

Casos de deformações em bobinas também puderam ser observados em um transformador trifásico. Este fato foi comprovado após a abertura do transformador.

Por último, é importante ressaltar que, para que o diagnóstico possa ser feito de maneira eficaz, é necessário haver algum tipo de comparação com informações obtidas previamente, seja através de dados da vida passada do equipamento, seja pela comparação com outros equipamentos da mesma família (mesmo fabricante, projeto e ano de fabricação). Por este motivo, torna-se importante a criação de um banco de dados que caracterize toda a vida do transformador e de equipamentos de mesma família.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] - Cerqueira, W. - "Resposta de Transformadores de Potência a Sinais Reduzidos", Relatório Técnico CEPEL - 851/97.

[2] - Martins, H. - " Avaliação de Transformadores Elevadores da UHE Luiz Gonzaga - CHESF", Relatório Técnico CEPEL - 1190/98.

[3] - Martins, H. - "Avaliação de Transformadores de Potência da Light - Grupo II", Relatório Técnico CEPEL - 165/99.

[4] - Cerqueira, W. -"Medições de Respostas em Freqüência e de Impedâncias Terminais em Transformadores Monofásicos de 13,8/500 kV, 63,3 MVA de fabricação Trafo-Union na UHE de Marimbondo, de Furnas em Fronteira - MG", Relatório Técnico CEPEL - 236/99